

УДК 622.235.535.2

## О ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРАХ СЕЙСМОВЗРЫВНЫХ ВОЛН

А. А. ВОВК, А. А. КУЗЬМЕНКО

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Получено 20.12.2001

Проведенные экспериментальные исследования величины периода колебаний в объемной и поверхностной волнах при взрыве цилиндрического заряда в различных грунтах позволили установить основное влияние на величину периода колебаний в сейсмозрывной волне радиуса заряда, а не его массы. Предложены инженерные формулы для расчета временных параметров сейсмических волн при взрыве цилиндрического заряда в зависимости от его конструктивных особенностей и пути распространения волны от его места взрыва в различных грунтах.

Проведені експериментальні дослідження величини періоду коливань в об'ємній і поверхневій хвилях при підриві циліндричного заряду у різних грунтах показали, що на величину періоду коливань сейсмовибухової хвилі у більшій мірі впливає радіус заряду, а не його маса. Запропоновані інженерні формули для розрахунку часових параметрів сейсмовибухових хвиль при підриві циліндричного заряду в залежності від його конструктивних особливостей і шляху розповсюдження хвилі від місця вибуху у різних грунтах.

The carried out experimental researches of the period of fluctuationis in volumetric and superficial waves at explosion of a cylindrical charge in various soils have allowed to establish, that, basis on size of the period of fluctuations in a seismic wave is depend mainly on the charge radius, instead of its weight. The engineering formulas for calculations of temporary parameters of seismic waves at explosion of a cylindrical charge in dependence on its design features and a wave distribution way from a place of explosion in various soils are offered.

### ВВЕДЕНИЕ

Основным критерием сейсмоопасности для зданий и сооружений при взрывных работах (ВР) является скорость смещения грунта. Но при этом важную роль играет также период колебаний в сейсмозрывной волне, особенно в резонансной области, когда значения периода колебательного процесса в грунте приближаются к собственным периодам колебаний охраняемых объектов [1, 2]. Поэтому прогнозирование величин периодов при ведении ВР в зависимости от характеристик применяемых зарядов в конкретно сложившейся обстановке имеет важное значение для обеспечения безопасности проводимых работ. Однако до настоящего времени нет однозначного ответа от исследователей о степени влияния характеристик заряда на величину периода колебаний в сейсмозрывной волне. Применяемая формула для определения величины периода  $T = k \lg r$  [3] (здесь  $k$  – коэффициент, учитывающий свойства грунта;  $r$  – расстояние) не содержит в своей структуре характеристик заряда, т.е. она не отражает связи с ВР.

В некоторых работах, связанных с исследованиями сферического заряда [4, 5], установлена прямая связь между периодом колебаний и массой заряда, а в работах, где анализировались взрывы цилиндрических (скважинных) зарядов [6], такой связи не установлено.

Забегая наперед, следует отметить, что на осно-

ве исследований, проведенных в отделе прикладной геодинамики взрыва, установлена прямая связь между периодом колебаний сейсмозрывной волны и радиусом заряда. Поэтому исследователи воздействия на грунт взрывов сферических зарядов, масса которых прямо пропорциональна радиусу заряда, установили связь между периодом колебаний и массой заряда, а исследователи цилиндрических зарядов (а это, в основном, были скважинные заряды одного радиуса на каком-то горном предприятии) не установили отмеченной связи, так как при взрывании нескольких скважинных зарядов одного и того же радиуса масса заряда возрастает, но период колебаний изменяется незначительно.

Только проведение целенаправленных исследований, состоящих из серий взрывов с различными радиусами и длиной зарядов позволило установить зависимость между величиной периода колебаний в сейсмозрывной волне и характеристикой цилиндрического заряда.

### 1. МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

В настоящей работе рассматриваются зависимости временных параметров в объемной и поверхностной волнах от расстояния и конструктивных особенностей цилиндрического заряда при взрыве последнего вблизи дневной поверхности.

Наблюдения за параметрами сейсмозрывных

волн и обработка экспериментального материала проводились по методике, которая использовалась в работе [7]. Волновые процессы при взрывах исследуемых зарядов в качественном отношении также соответствуют тем, которые представлены на рис. 1 в работе [7].

В ближней зоне действия взрыва, которая отождествляется с зоной необратимых деформаций грунтов [7, 8], доминирующей по интенсивности колебаний является объемная волна  $P_0$ , а общепризнанной основной временной ее характеристикой является время нарастания скорости смещения до максимума в положительной фазе колебаний  $t_H$ .

В дальней (упругой) зоне действия взрыва продольная волна  $P$  характеризуется периодом колебаний  $T_P$ . В этой зоне, доминирующей по интенсивности воздействия на свободную поверхность грунта, является поверхностная волна  $R$ , которая характеризуется периодом колебаний  $T_R$ .

## 2. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МАТЕРИАЛА

Подтверждением того, что величина периода в продольной и поверхностной волнах при взрыве цилиндрического заряда зависит от радиуса единичного заряда, а не от массы одного или нескольких зарядов, взрывааемых одновременно, являются зависимости указанных периодов от расстояния, представленные на рис. 1.

Так, позицией  $a$  на рис. 1 помечены зависимости типа  $T = f(r)$  при четырех взрывах зарядов равного диаметра 21 мм в глинистых грунтах (темные точки – поверхностная волна, светлые – продольная). Количество зарядов массой 3 кг этих взрывов изменялось от 1 до 8, т. е. масса одновременно взрывааемых зарядов увеличивалась в 8 раз, а экспериментальные точки, характеризующие период колебаний, группируются вдоль одной прямой, что говорит о преимущественной зависимости периода колебаний от одной и той же (общей для данной серии взрывов) характеристики заряда. В данном случае такой общей характеристикой является радиус заряда. Коэффициенты вариации опытных данных следующие: 12% – для продольной и 10.5% – для поверхностной волн.

Аналогичная картина наблюдается при взрывах зарядов равного диаметра 160 мм в сернистых известняках (п. б, рис. 1), когда общая масса одновременно взрывааемых скважинных зарядов составляла 40, 80, 120 и 240 кг, а экспериментальные точки, соответствующие величине периода колебаний, группируются вдоль одной прямой с коэффициентами вариации 12.3% и 9% соответственно

для волн  $P$  и  $R$ .

При одновременном взрывании различного количества скважинных зарядов диаметром 220 мм в гранитах (п. в, рис. 1) наблюдается аналогичная картина зависимости периода колебаний не от массы, а от радиуса (диаметра) заряда. Коэффициенты вариации экспериментального материала в этом случае 12.8% и 9.8% соответственно для волн  $P$  и  $R$ . Исследования сейсмoeffекта при взрывах цилиндрических зарядов показали, что, кроме радиуса заряда и свойств грунта, на величину периода колебаний оказывает влияние длина заряда.

Для изучения влияния конструктивных особенностей цилиндрического заряда на величину периода колебаний в рассматриваемых волнах были проведены в суглинистых грунтах взрывы глубинной серии зарядов (постоянная линейная масса зарядов и переменная их длина) и масштабной серии (постоянная длина зарядов и переменная линейная масса). Характеристика зарядов указанных взрывов приведена в работе [7], где исследовалась скорость смещения грунта при взрывах этих же цилиндрических зарядов. В результате экспериментальных исследований были получены зависимости времени нарастания скорости смещения грунта до максимума от расстояния в объемной волне для ближней и дальней зон при взрыве глубинной и масштабной серий зарядов (рис. 2), а также аналогичные зависимости для поверхностной волны (рис. 3).

Коэффициенты вариации опытных данных составляют 5–8% для объемной и 5–9% для поверхностной волн, а коэффициенты корреляции зависимостей типа  $t_H = f(\bar{r})$  и  $T_R = f(\bar{r})$  соответственно  $(-0.91) - (-0.95)$  и  $0.73 - 0.91$ , что является вполне приемлимым для установления количественных зависимостей между временными параметрами волновых процессов и условиями взрывания. В вышеприведенных зависимостях  $\bar{r}$  – приведенное к массе заряда расстояние от места взрыва.

Экспериментальные данные показывают, что значения основных временных параметров сейсмозрывных волн ( $t_H, T_P, T_R$ ) зависят от радиуса заряда, его длины и свойств взрываемого грунта, а их зависимости от расстояния распространения волн имеют свои особенности для разного типа волн. В ближайшей зоне действия взрыва время нарастания амплитуды колебаний до максимума в волне  $P_0$  уменьшается с расстоянием до границы с упругой зоной. В упругой зоне, где распространяются сформировавшиеся продольная и поверхностная волны, период колебаний в волне  $P$  с рас-

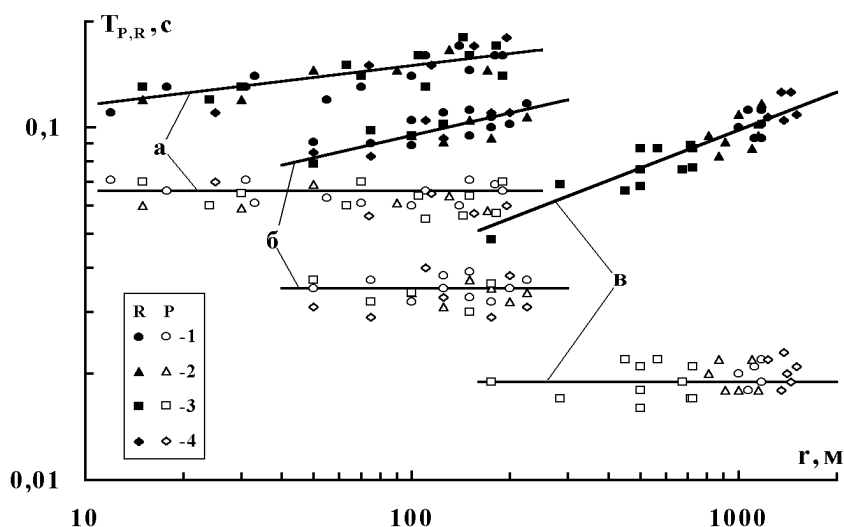


Рис. 1. Зависимости периодов колебаний от расстояний в волнах  $P$  и  $R$  при взрывах скважинных зарядов в различных грунтах,  $m$  – количество одновременно взрывааемых зарядов:  
 а – глина, радиус зарядов  $r_3 = 0.0105$  м, длина зарядов  $l = 6$  м,  $1 - m = 1$ ,  $2 - m = 2$ ,  $3 - m = 4$ ,  $4 - m = 8$ ;  
 б – сернистый известняк,  $r_3 = 0.08$  м,  $l = 2.25$  м,  $1 - m = 1$ ,  $2 - m = 2$ ,  $3 - m = 3$ ,  $4 - m = 6$ ;  
 в – гранит,  $r_3 = 0.11$  м,  $l = 9.5-10.3$  м,  $1 - m = 3$ ,  $2 - m = 5$ ,  $3 - m = 6$ ,  $4 - m = 7$

стоянием практически не изменяется, а в волне  $R$  он возрастает с расстоянием по степенной зависимости, причем интенсивнее в скальных грунтах по сравнению с мягкими.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ НАБЛЮДЕНИЙ

С целью удобства анализа зависимостей величины периода колебаний от расстояния и конструктивных особенностей заряда, а также для получения количественных зависимостей в обобщающей форме целесообразно расстояние представить в виде приведенной величины от массы заряда  $\bar{r} = r/Q_n$ . Моделируемость временных параметров волнового процесса при взрыве цилиндрического заряда по отношению к массе заряда и расстоянию, проведенная по методике работы [7], показала, что при построении обобщающих зависимостей типа  $T = f(r)$ , временные параметры должны быть умножены на масштабный коэффициент  $1/Q_n^{1/6}$ , а соответствующие им расстояния – на  $1/Q_n^{1/3}$ . Здесь  $Q_n$  – линейная масса заряда (кг/м), а  $Q$  – масса единичного цилиндрического заряда (кг).

Выше отмечалось, что величина периода колебаний зависит от радиуса заряда, но линейная мас-

са заряда прямо пропорциональна радиусу заряда, поэтому в дальнейшем для удобства аналитических расчетов и применения формул по определению величины периода колебаний на практике будем использовать величину  $Q_n$ .

Математическая обработка экспериментальных данных взрывов глубинной и масштабной серий по методике, используемой в работе [7], позволила выразить зависимость времени нарастания амплитуды колебаний до максимума ( $c$ ) в объемной волне в ближней зоне по вертикальной составляющей при взрыве цилиндрического заряда в следующем виде:

$$t_H^z = k_H Q_n^{1/6} (0.4 + 1/l) \cdot \bar{r}^{-0.85l^{-1/5}}, \quad (1)$$

где  $l$  – длина заряда, м.

Аналогичным образом была получена формула для горизонтальной (радиальной) составляющей колебаний грунта:

$$t_x^z = k_H Q_n^{1/6} (0.9 + 1/l) \cdot \bar{r}^{-0.35l^{-1/4}}. \quad (2)$$

Формулы (1) и (2) применимы в пределах ближней зоны действия взрыва, начиная с расстояний  $r \geq l/2$  при цилиндричности заряда 100–2000 и забойке 100–150 радиусов заряда.

Зависимости величины периода колебаний ( $c$ ) от расстояния и конструктивных особенностей ци-

Табл. 1. Коэффициенты условий взрывания

Грунт	Тип волны							
	$P_o$		$P$		$R$			
	Составляющая колебательного процесса							
	z	x	z	x	z		x	
$K_H$	$K_H$	$K_T$	$K_T$	$K_T$	$\nu$	$K_T$	$\nu$	
Глина, суглинок	0.1	0.05	0.065	0.12	0.095	0.1	0.065	0.15
Сернистый известняк	–	–	0.012	0.015	0.027	0.21	0.038	0.18
Гранит	–	–	0.01	0.012	0.005–0.007	0.38	0.014–0.02	0.2

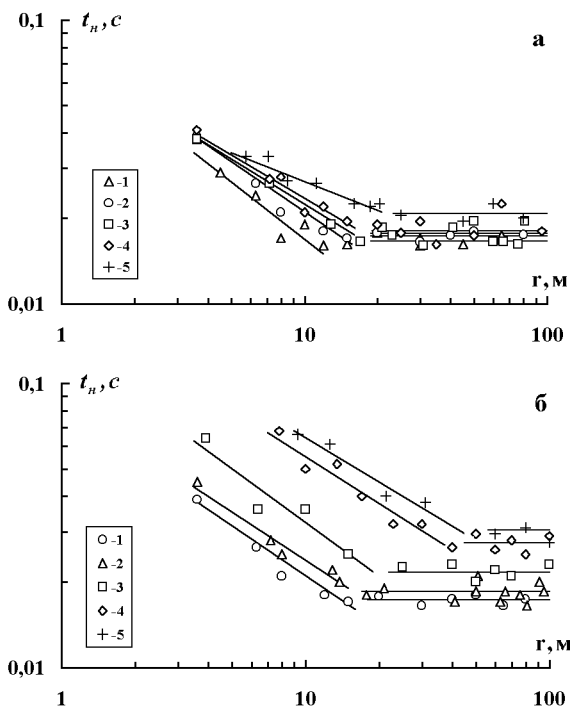


Рис. 2. Зависимости времени нарастания скорости смещения грунта до максимума в объемной волне от расстояния при взрывах цилиндрических зарядов глубинной (а) и масштабной (б) серии,  $l$  – длина заряда:

а: 1 –  $l = 4$  м, 2 –  $l = 8$  м, 3 –  $l = 10.5$  м, 4 –  $l = 12$  м, 5 –  $l = 30$  м (линейная масса зарядов  $Q_{\text{л}} = 1$  кг/м);  
 б: 1 –  $Q_{\text{л}} = 1$  кг/м, 2 –  $Q_{\text{л}} = 1.5$  кг/м, 3 –  $Q_{\text{л}} = 3.85$  кг/м, 4 –  $Q_{\text{л}} = 16.5$  кг/м, 5 –  $Q_{\text{л}} = 30$  кг/м (длина зарядов  $l = 8$  м)

линдрического заряда в упругой области колебаний будут иметь следующий вид:

для продольной волны

$$T_p^{z,x} = k_T \cdot Q_{\text{л}}^{1/6} (0.01l + 1), \quad (3)$$

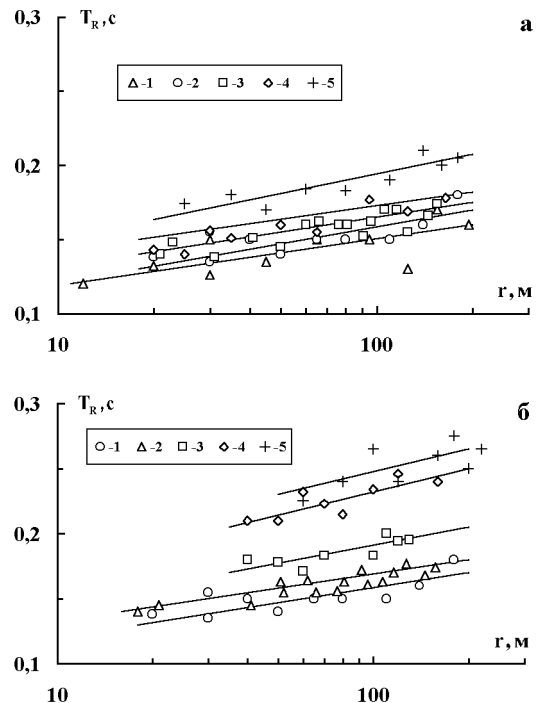


Рис. 3. Зависимости периода колебаний скорости смещения грунта в поверхностной волне от расстояния при взрывах цилиндрических зарядов глубинной (а) и масштабной (б) серий,  $l$  – длина заряда:

а: 1 –  $l = 4$  м, 2 –  $l = 8$  м, 3 –  $l = 10.5$  м, 4 –  $l = 12$  м, 5 –  $l = 30$  м (линейная масса зарядов  $Q_{\text{л}} = 1$  кг/м);  
 б: 1 –  $Q_{\text{л}} = 1$  кг/м, 2 –  $Q_{\text{л}} = 1.5$  кг/м, 3 –  $Q_{\text{л}} = 3.85$  кг/м, 4 –  $Q_{\text{л}} = 16.5$  кг/м, 5 –  $Q_{\text{л}} = 30$  кг/м (длина зарядов  $l = 8$  м).

для поверхностной волны

$$T_R^{z,x} = k_T Q_{\text{л}}^{1/6} (0.015l + 1) \cdot \bar{r}^{\nu}. \quad (4)$$

Как показала проверка, формулы (3) и (4) применимы для определения величины периода в различных грунтах с учетом соответствующих коэф-

фициентов.

Значения коэффициентов условий взрывания и распространения волновых процессов в формулах (1)–(4) представлены в таблице. Там же приведены средние значения указанных коэффициентов. При практических расчетах для обеспечения запаса прочности их значения могут корректироваться величинами коэффициентов вариации опытных данных, приведенными в работе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментальными исследованиями в работе установлена зависимость величины периода колебаний при взрыве цилиндрического заряда в большей степени от радиуса заряда.

2. Предложены инженерные формулы для расчета величины периода колебаний в объемных и поверхностной волнах на пути их распространения от места взрыва в различных грунтах.

3. Использование результатов настоящих исследований позволяет надежно прогнозировать сейсмобезопасное ведение взрывных работ в промышленности с учетом характеристики защищаемых объектов.

1. Миронов П.С. Взрывы и сейсмобезопасность сооружений. – М: Недра, 1973. – 168 с.
2. Walker S. Development of response spectra techniques for prediction of structural damage from open-pit blasting // Trans. Inst. Mining and Met. – 1982. – A91. – P. 55-62.
3. Справочник взрывника/Б.Н. Кутузов, В.М. Ско-робогатов, И.Е. Ерофеев и др. Под общей ред. Б.Н. Кутузова. – М.: Недра, 1988. – 511 с.
4. Рулев Б.Г. Динамические характеристики сейсмических волн при подземных взрывах // Взрывное дело. – М.: Недра, 1968. – N64/21. – С. 109–158.
5. Богацкий В.Ф., Пергамент В.Х. Сейсмическая безопасность при взрывных работах. – М: Недра, 1978. – 128 с.
6. Печенкин В.Д., Пятков А.Ф. Периоды колебаний грунта при промышленных взрывах // Научн. тр. Магнитогорского горно-металлургического ин-та. – 1975. – Вып.15. – С. 66–72.
7. Вовк А.А., Кузьменко А.А. Сейсмическое действие взрыва цилиндрического заряда // Прикладна гідромеханіка. – 2001. – Том 3(75). – С. N4.
8. Вовк О.О., Кузьменко А.О., Кравец В.Г., Смірнов А.Г. Про вивчення зони залишкових деформацій ґрунтів сейсмометричними методами // Доповіді АН УРСР, сер. А. – 1971. – N2. – С. 951–954.